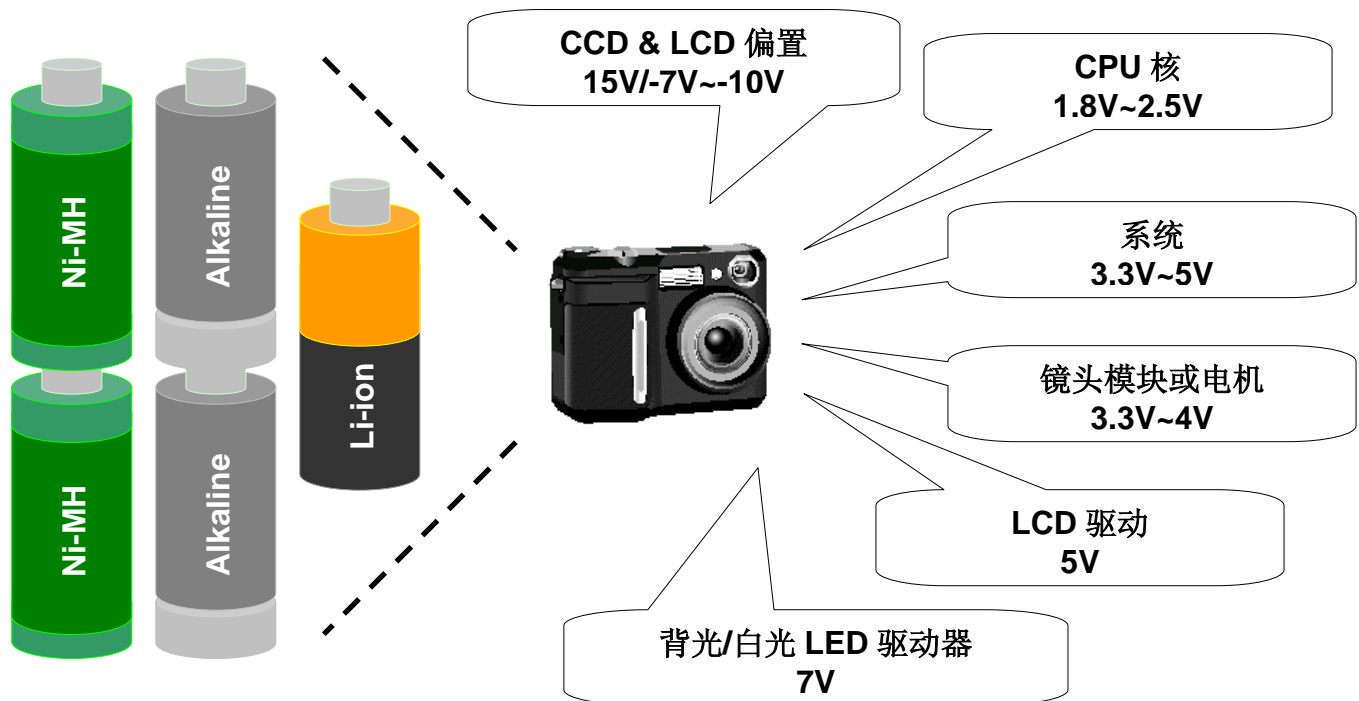


数码相机升/降压电源设计

黄大峰/ Maxim Taiwan

1. 前言:

数码相机的电源输入多为单节锂电池或两节镍氢电池, 或 2 至 3 节碱性(AA) 电池。单节锂电池的电压范围 2.5V~4.2V, 两节镍氢电池的电压范围为 1.8V~3.0V。输出包括为系统逻辑供电的 3.3V, 为 CPU 核供电 1.8V 或 2.5V, 以及其它各组输出电压。如果数码相机同时支持锂电池和镍氢电池, 则输入电压范围为 1.8V~ 4.2V, 而输出 2.5V 和 3.3V 刚好介于输入 1.8V~4.2V 之间。当输入端的电池电压高于 3.3V 时, 需要以降压方式产生 3.3V; 当输入电池电压低于 3.3V 时, 需要以升压方式产生 3.3V。2.5V 输出须采用相同架构。



大部份的电源设计采取先升压、后降压的方案。这种设计必须有两个 PWM 控制器, 一个为升压 PWM 控制器、一个为降压 PWM 控制器。SEPIC 转换架构与 Buck & Boost 转换架构可解决此问题。

SEPIC 转换器仅需一个 PWM 控制器和一个变压器 (或两个独立电感), 就可产生指定的电压输出。Buck & Boost 转换器也仅需要一个 PWM 控制器和一个电感、两个 MOSFET 产生指定的电压输出。相对之下, SEPIC 转换器的成本更低, 而 Buck & Boost 转换器占用的电路板空间较小。这两种电路结构普遍用于电池供电的便携式电子产品。本文将对这两种线路架构进行分析。

2. 理论分析:

图 (A) 所示为 SEPIC 转换器架构，假设电容器 (C_P)、(C_{OUT}) 已被充电。当功率开关 (Q₁) 导通时，来自输入电压 (V_{IN}) 的能量会储存在电感 (L₁)；同时电容器 (C_P) 的储能会存储在电感 (L₂)；当二极管 (D₁) 阳极电位小于输出电压 (V_O) 时，二极管 (D₁) 被反向偏置，由输出电容器 (C_{OUT}) 的存储电荷为负载提供输出电流。当功率开关 (Q₁) 在截止状态时，电流会继续流过电感 (L₁)、(L₂)，不过此时电感会改变磁场；所以，其电压极性会反转过来，如此使二极管 (D₁) 为正向偏压。并且使储存在电感器的能量为负载供电。

综上所述，在功率开关 (Q₁) 导通时能量会储存在电感 (L₁)、(L₂)，而电感 (L₁) 之电压为输入电压 (V_{IN})，电感 (L₂) 电压与电容 (C_P) 电压相反。功率开关 (Q₁) 在截止状态时，会将电感 (L₁) 的能量与输入电压 (V_{IN}) 重迭，同时电感 (L₂) 的能量会输出至负载上。此时加在电感 (L₁) 的电压为 (V_{CP}+V_{OUT}-V_{IN})；而加在电感 (L₂) 的电压为 (V_{L1}+V_{IN}-V_{CP})，参照电感 (L₁) 的电压表达式，则电感 (L₂) 的电压亦为 (V_{OUT})。

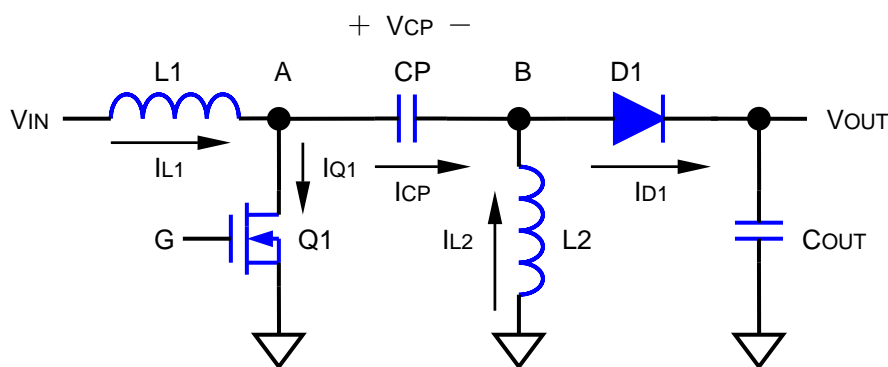


图 (A)

对 SEPIC 转换器而言，其工作模式分为两种：

- (1) 连续导通模式 (CCM)
- (2) 不连续导通模式 (DCM)

连续导通模式 (CCM) 分析：

- (1) 第一个工作状态为功率开关 (Q₁) 在导通期间。此时电感 (L₁)、(L₂) 之电压分别为：

$$V_{L1}(t) = V_{IN}$$

$$V_{L2}(t) = V_{CP}$$

而流经电感两端之电流则分别为：(0 ≤ t ≤ DT_s)

$$I_{L1}(t) = I_{L1}(0) + \frac{1}{L_1} \int_0^t V_{L1}(t) dt = I_{L1}(0) + \frac{1}{L_1} V_{IN} t$$

$$I_{L2}(t) = I_{L2}(0) + \frac{1}{L_2} \int_0^t V_{L2}(t) dt = I_{L2}(0) + \frac{1}{L_2} V_{CP} t$$

在 (t = DT_s) 时，则分别为：

$$I_{L1}(DT_s) = I_{L1}(0) + \frac{1}{L_1} V_{IN} DT_s \dots \dots \dots (2-1)$$

图 A 各点波形如下：

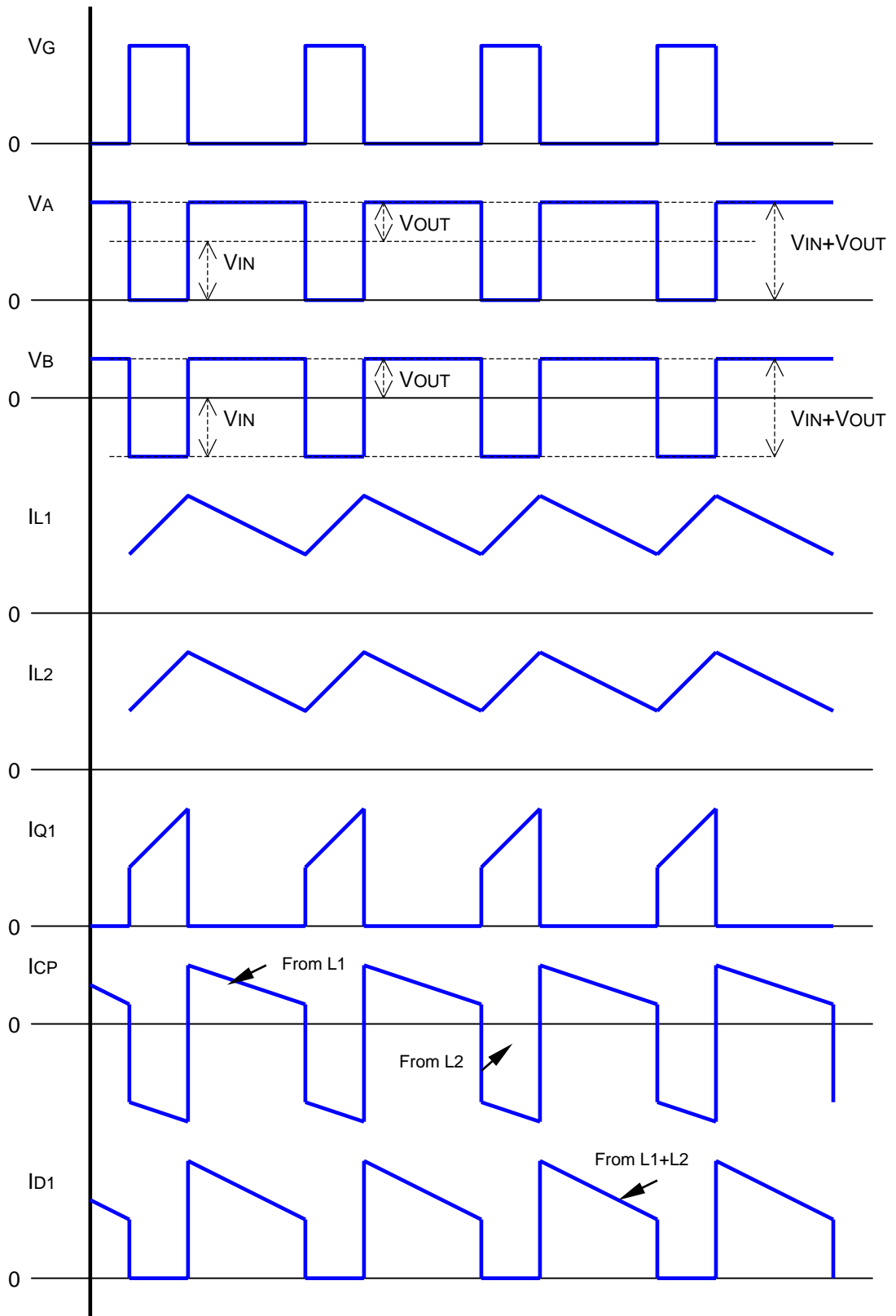


图 (B)

$$I_{L2}(DT_S) = I_{L2}(0) + \frac{1}{L_2} V_{CP} DT_S$$

.....(2-2)

(2) 第二个工作状态为功率开关 (Q1) 在截止期间。此时电感 (L1)、(L2) 之电压分别为:

$$V_{L1}(t) = V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN}$$

$$V_{L2}(t) = V_{OUT}$$

而流经电感两端之电流则分别为: ($DT_S \leq t \leq T_S$)

$$I_{L1}(t) = I_{L1}(DT_S) + \frac{1}{L_1} \int_{DT_S}^t V_{L1}(t) dt = I_{L1}(DT_S) + \frac{1}{L_1} [-(V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN})] \cdot (t - DT_S)$$

$$I_{L2}(t) = I_{L2}(DT_S) + \frac{1}{L_2} \int_{DT_S}^t V_{L2}(t) dt = I_{L2}(DT_S) + \frac{1}{L_2} (-V_{OUT}) \cdot (t - DT_S)$$

在 ($t = T_S$) 时, 分别为:

$$I_{L1}(T_S) = I_{L1}(DT_S) + \frac{1}{L_1} [-(V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN})] \cdot (1 - D) \cdot T_S$$

.....(2-3)

$$I_{L2}(T_S) = I_{L2}(DT_S) + \frac{1}{L_2} (-V_{OUT}) \cdot (1 - D) \cdot T_S$$

.....(2-4)

由于转换器在稳态时, $I_L(T_S) = I_L(0)$, 所以, 由(2-1)式与(2-3)式可得:

$$I_{L1}(T_S) = I_{L1}(0) + \frac{1}{L_1} V_{IN} DT_S + \frac{1}{L_1} [-(V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN})] \cdot (1 - D) \cdot T_S$$

因此

$$\frac{1}{L_1} V_{IN} DT_S = \frac{1}{L_1} (V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN}) \cdot (1 - D) \cdot T_S$$

$$V_{IN} D = (V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN}) \cdot (1 - D)$$

.....(2-5)

由(2-2)式与(2-4)式可得:

$$I_{L2}(T_S) = I_{L2}(0) + \frac{1}{L_2} V_{CP} DT_S + \frac{1}{L_2} (-V_{OUT}) \cdot (1 - D) \cdot T_S$$

$$V_{CP} D = V_{OUT} \cdot (1 - D)$$

.....(2-6)

因为电感 (L1)、(L2) 具有相同的 D 值, 所以由(2-5)式与(2-6)式可得出电容器 (CP) 之电压等于输入电压 (VIN):

$$\begin{aligned}
D &= \frac{V_{OUT} \cdot (1-D)}{V_{CP}} \\
V_{IN} \frac{V_{OUT} \cdot (1-D)}{V_{CP}} &= (V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN}) \cdot (1-D) \\
V_{IN} \cdot V_{OUT} &= (V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN}) \cdot V_{CP} \\
V_{IN} \cdot V_{OUT} &= V_{CP} \cdot V_{CP} + V_{OUT} \cdot V_{CP} - V_{IN} \cdot V_{CP} \\
V_{IN} \cdot V_{OUT} + V_{IN} \cdot V_{CP} &= V_{CP} \cdot V_{CP} + V_{OUT} \cdot V_{CP} \\
(V_{OUT} + V_{CP}) \cdot V_{IN} &= (V_{CP} + V_{OUT}) \cdot V_{CP} \\
V_{IN} &= V_{CP}
\end{aligned}
\tag{2-7}$$

系：将(2-7)式代入(2-5)式或(2-6)式可得输入电压与输出电压占空比的关系：

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{D}{1-D}
\tag{2-8}$$

$$D = \frac{t_{ON}}{T_S}$$

由(2-8)式可得(2-9)式

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \left(\frac{D}{1-D} \right)
\tag{2-9}$$

或
$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN} + V_{OUT}}$$

由(2-9)式可知，若 V_{IN} 等于 V_{OUT} ，占空比则正好为 50%；若 V_{IN} 大于 V_{OUT} ，占空比则小于 50%；若 V_{IN} 小于 V_{OUT} ，占空比则大于 50%。SEPIC 转换器的临界条件是当功率开关（Q1）关断周期结束时，流经电感的电流（ I_L ）刚好为 0。

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_{IN} \cdot t_{ON}}{L_1} = \frac{(V_{CP} + V_{OUT} - V_{IN}) \cdot t_{OFF}}{L_1}
\tag{2-10}$$

$$\Delta I_{L2} = -\frac{V_{CP} \cdot t_{ON}}{L_2} = \frac{V_{OUT} \cdot t_{OFF}}{L_2}
\tag{2-11}$$

由(2-8)式可得

$$\frac{t_{ON}}{T_S} = \frac{V_{OUT} \cdot (1-D)}{V_{IN}}
\tag{2-12}$$

将(2-12)式代入(2-10)式或(2-11)式，得到电感电流（ I_L ）

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{L_1}$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{L_2}$$

由此可知，若要让 **SEPIC** 转换器工作在 **CCM** 情况下，则电感 (**L1**)、(**L2**) 之条件为：

$$I_{OUT} > \frac{\Delta I_{L1}}{2} = \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{2 \cdot L_1} \quad L_1 > \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{2 \cdot I_{OUT}}$$

$$I_{OUT} > \frac{\Delta I_{L2}}{2} = \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{2 \cdot L_2} \quad L_2 > \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{2 \cdot I_{OUT}}$$

当功率开关 (**Q1**) 导通时，电感 (**L2**) 亦会对 **CP** 充电，并且因为输出电流主要是由电感 (**L2**) 电流提供。在考虑 **CP** 电压的滤波时，通常设定 γ 参数为 **CP** 电压的 1% 到 5%。利用电容公式解得 **CP** 为：

$$C_P = \frac{I_{L2} \cdot t_{ON}}{\gamma \cdot V_{IN}} \quad C_P = \frac{I_{OUT} \cdot D \cdot T}{\gamma \cdot V_{IN}}$$

选择适当的功率开关 (**Q1**) 和二极管 (**D1**) 组件，以功率开关 (**Q1**) 而言：

$$I_{Q1}(\max) = I_{OUT} \left(\frac{D}{1-D} \right)$$

$$V_{DS} = V_{IN} + V_{OUT}$$

考虑二极管 (**D1**) 组件：

$$I_{D1} = I_{OUT}$$

$$V_D = V_{IN} + V_{OUT}$$

图 (C-1) 所示为 **Buck & Boost** 转换器架构。当功率开关 (**Q1**) 在导通状态，而功率开关 (**Q2**) 在截止状态时，此时功率开关 (**Q3**) 也会因为 (**Q1**) 的导通而促使 (**Q3**) 也呈现导通状态，则由输入电压 (**VIN**) 所得之能量会储存在电感 (**L**) 上；此时由于在二极管 (**D1**) 阳极之电位会小于输出电压 (**Vo**)，所以，二极管 (**D1**) 被反向偏压。此时会由输出电容器 (**CoUT**) 为负载提供电流。

当功率开关 (**Q1**) 在截止状态、开关 (**Q2**) 在导通状态时，功率开关 (**Q3**) 也会因为 (**Q2**) 的导通而促使 (**Q3**) 呈现截止状态，电流会继续流过电感 (**L**)，不过此时电感会改变磁场；其电压极性将发生反转，使二极管 (**D1**) 为正向偏置。并且使得储存在电感器的能量产生输出电流至负载。

综上所述，功率开关 (**Q1**)、(**Q3**) 导通状态、(**Q2**) 截止状态时，能量会储存在电感 (**L**) 上，而电感 (**L**) 上之电压则为输入电压 (**VIN**)；至于功率开关 (**Q1**)、(**Q3**) 截止，(**Q2**) 导通时，电感 (**L**) 储能输出至负载。

Buck & Boost 转换器架构:

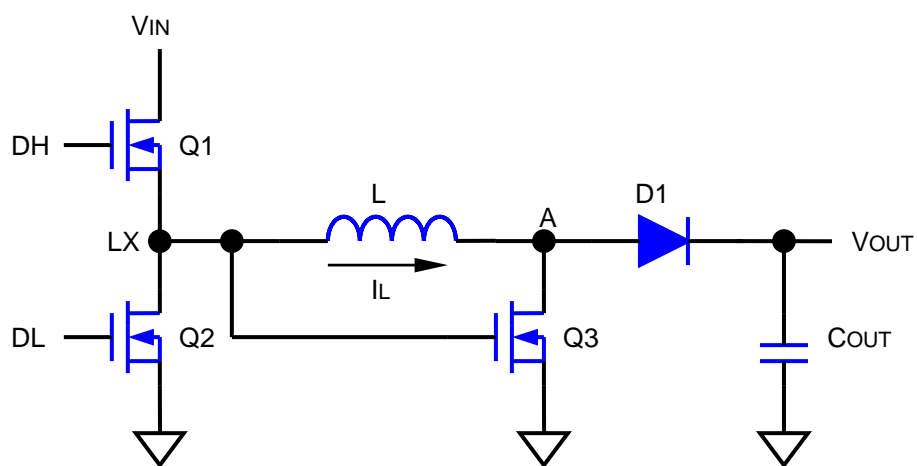


图 (C-1)

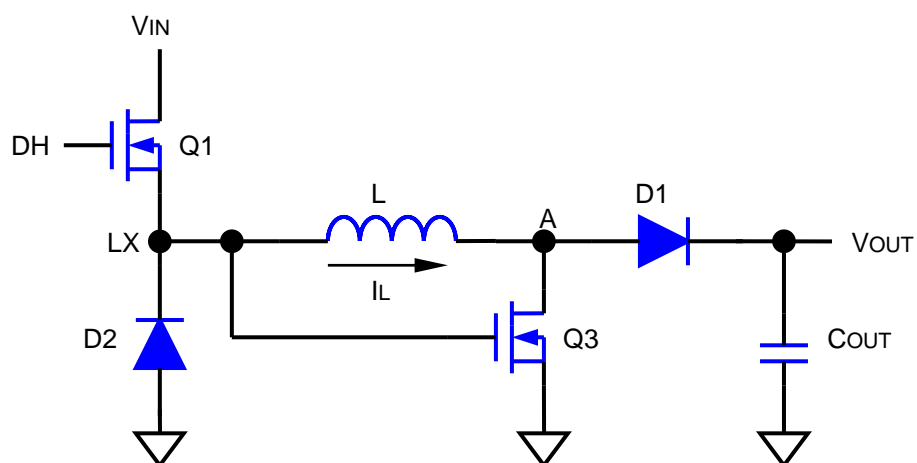


图 (C-2)

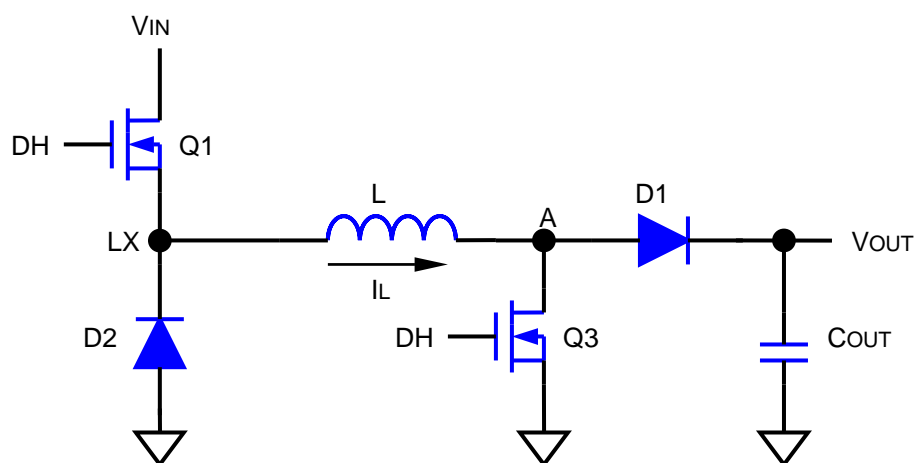


图 (C-3)

对 Buck & Boost 转换器而言, 其操作模式亦可区分为两种: 连续导通模式 (CCM) 和不连续导通模式 (DCM)。

Buck & Boost 各点的波形如下：

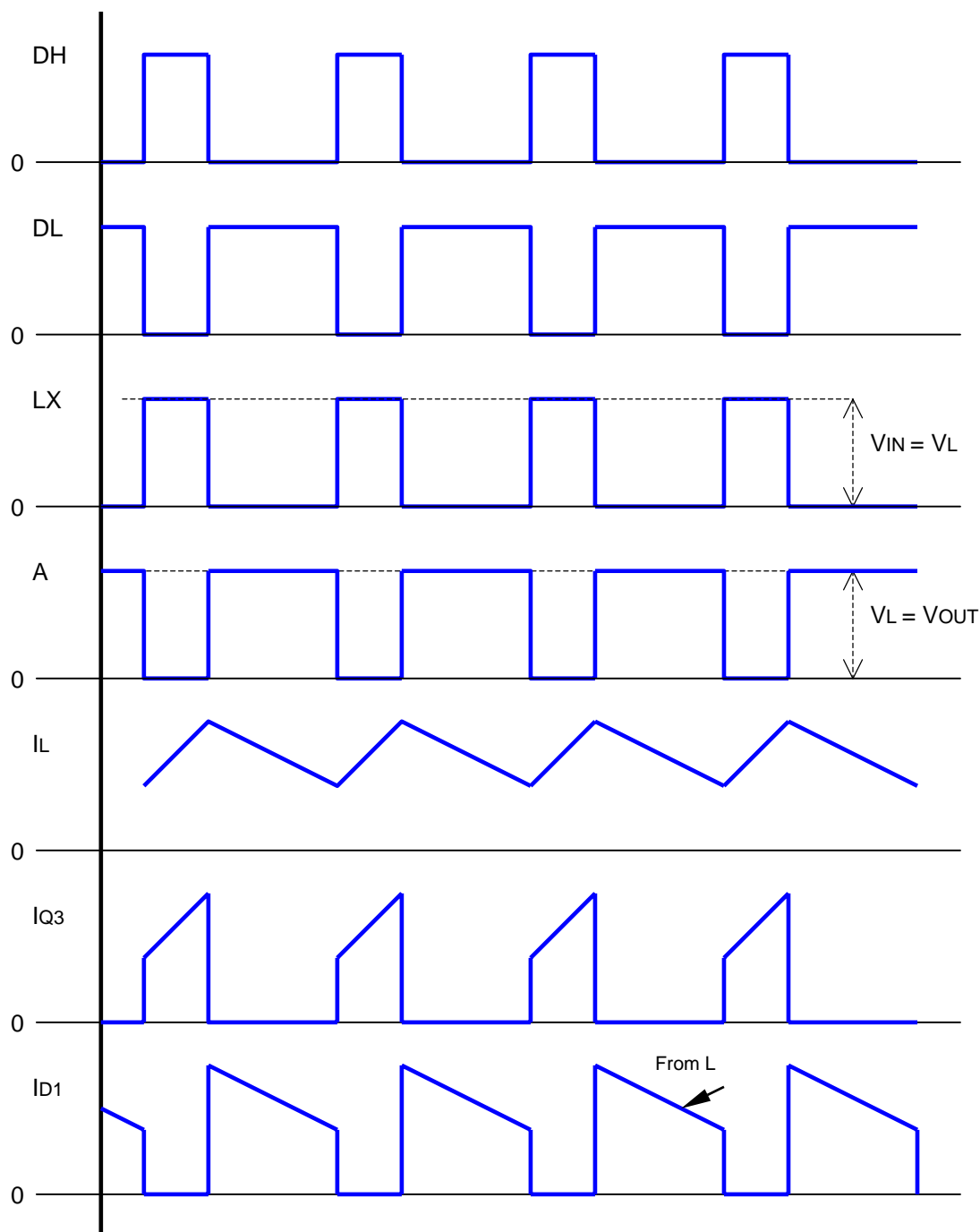


图 (D)

连续导通模式 (CCM) 分析：

(1) 第一个工作状态为功率开关 (Q1)、(Q3) 导通状态，(Q2) 截止。此时电感 (L) 电压为：

$$V_L(t) = V_{IN}$$

而流经电感的电流分别为：(0 ≤ t ≤ DT_s)

$$I_L(t) = I_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t V_L(t) dt = I_L(0) + \frac{1}{L} V_{IN} t$$

在($t = DT_s$)时, 则为:

$$I_L(DT_s) = I_L(0) + \frac{1}{L} V_{IN} DT_s$$

.....(3-1)

(2) 第二个工作状态为功率开关 (Q1)、(Q3) 截止, (Q2) 导通。此时电感 (L) 电压为:

$$V_L(t) = V_{OUT}$$

而流经电感之电流分别为: ($DT_s \leq t \leq T_s$)

$$I_L(t) = I_L(DT_s) + \frac{1}{L} \int_{DT_s}^t V_L(t) dt = I_L(DT_s) + \frac{1}{L} (-V_{OUT}) \cdot (t - DT_s)$$

在($t = T_s$)时, 则为:

$$I_L(T_s) = I_L(DT_s) + \frac{1}{L} (-V_{OUT}) \cdot (1 - D) \cdot T_s$$

.....(3-2)

由于转换器在稳态时, $I_L(T_s) = I_L(0)$, 所以, 由(3-1)式与(3-2)式可得:

$$I_L(T_s) = I_L(0) + \frac{1}{L} V_{IN} DT_s + \frac{1}{L} (-V_{OUT}) \cdot (1 - D) \cdot T_s$$

可得出输入电压与输出电压占空比之关系:

$$\frac{1}{L} V_{IN} DT_s = \frac{1}{L} \cdot V_{OUT} \cdot (1 - D) \cdot T_s$$

$$V_{IN} D = V_{OUT} \cdot (1 - D)$$

.....(3-3)

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{D}{1 - D}$$

.....(3-4)

此时 $D = \frac{t_{ON}}{T_s}$

由(3-4)式可得(3-5)式

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN} + V_{OUT}} = D$$

.....(3-5)

由(3-5)式可得, 输入电压与输出电压占空比之关系与 SEPIC 转换器相同, 若 V_{IN} 等于 V_{OUT} , 占空比则正好为 50%; 若 V_{IN} 大于 V_{OUT} , 占空比则小于 50%; 若 V_{IN} 小于 V_{OUT} , 占空比则大于 50%。

对 Buck & Boost 转换器的临界条件是: 功率开关 (Q1) 关断周期结束时,

电感电流 (IL) 刚好为 0。

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN} \cdot t_{ON}}{L} \dots\dots\dots(3-6)$$

由(3-4)式可得

$$\frac{t_{ON}}{T_S} = \frac{V_{OUT} \cdot (1-D)}{V_{IN}} \dots\dots\dots(3-7)$$

将(3-7)式代入(3-6)式可得电感电流 (IL)

$$\Delta I_L = \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{L}$$

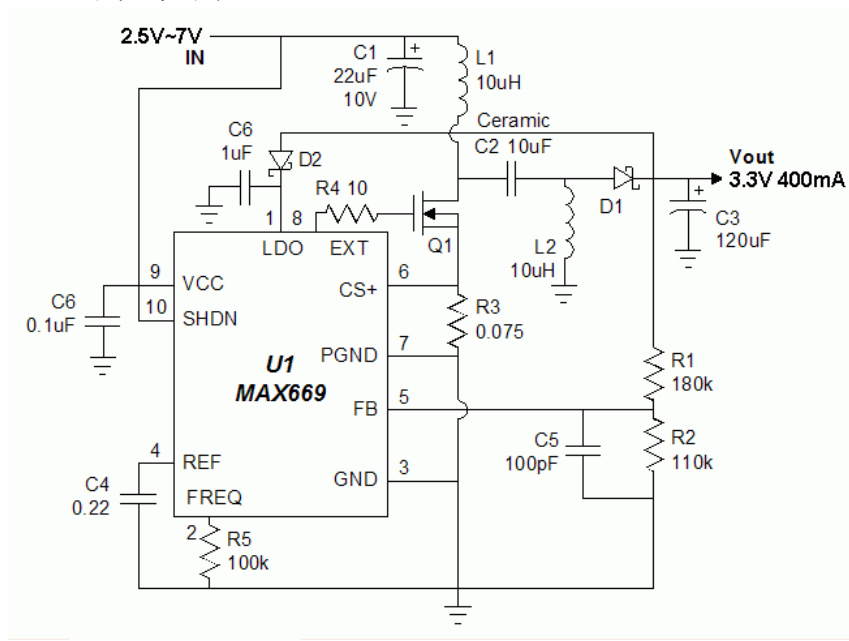
由此可知，若要 Buck & Boost 转换器工作在 CCM 情况下，则电感 (L) 为：

$$I_{OUT} > \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{2 \cdot L} \qquad L > \frac{V_{OUT} \cdot T_S \cdot (1-D)}{2 \cdot I_{OUT}}$$

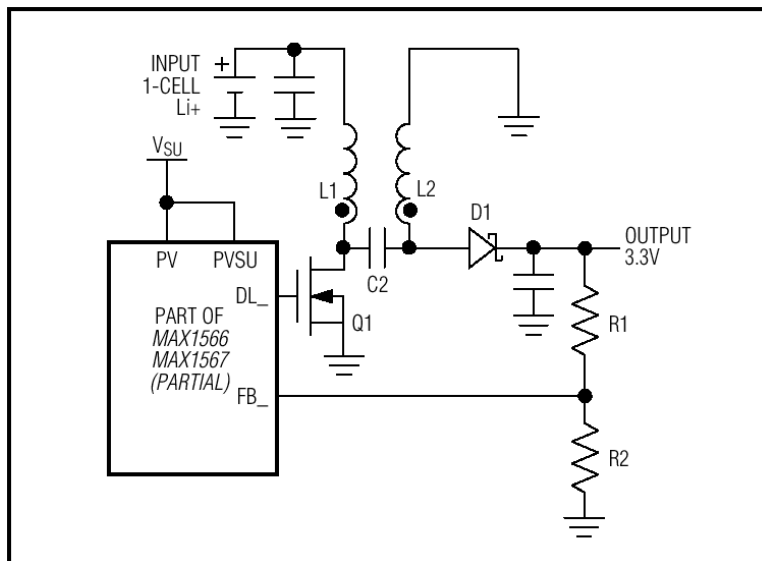
选择适当的功率开关和二极管组件，使系统更稳定。

3. 范例：

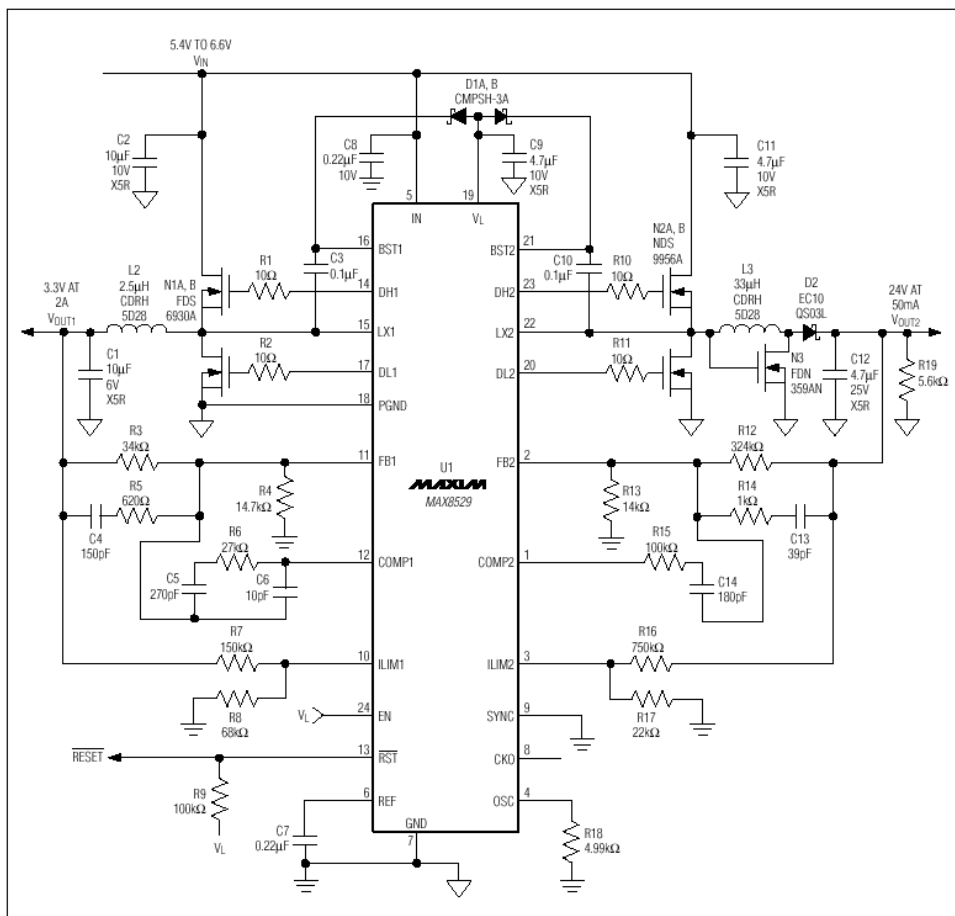
范例一：输入电压范围 2.5V~5V，预置 3.3V 输出，此应用可参考 SEPIC 电路设计。下图为 MAX669 的 SEPIC 应用电路，输入电压 2.5V~7V，输出电压为 3.3V，输出电流最大值为 400mA。



范例二：锂电池（Li-ion）输入，电压范围 2.9V~4.2V，预置 3.3V 输出，此应用可参考 SEPIC 电路设计。下图为 MAX1566/MAX1567 的 SEPIC 应用电路。



范例三：下图为 MAX8529 应用电路，MAX8529 为两组降压（Buck）PWM 控制器，本参考电路利用一组为纯降压（Buck）结构，产生 3.3V 输出；另一组利用 Buck & Boost 电路，产生 24V 高输出电压。



4. 结论:

SEPIC转换器仅仅需要一个**PWM**控制器和一个变压器（两个独立电感）即可产生指定电压。**Buck & Boost** 的转换器线路架构仅需要一个**PWM**控制器和一个电感、两个 **MOSFET**，产生指定电压。相比之下，**SEPIC**转换器成本较低，而 **Buck & Boost**转换器占用的电路板空间较小。